

种植大豆地表土壤溅蚀效应及其空间分布特征*

马波¹ 吴发启^{1†} 马璠²

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(2 宁夏农林科学院荒漠化治理研究所, 银川 750002)

摘要 为系统研究种植大豆条件下农地溅蚀速率变化特征并建立简单易用的模型, 评价大豆种植对土壤溅蚀的影响, 采用室内模拟降雨的方法, 测定了不同降雨强度(40 mm h⁻¹和 80 mm h⁻¹)、不同大豆生长阶段(始花期、盛花期、结荚期和始粒期)下的穿透雨强度和溅蚀速率, 分析了大豆冠下溅蚀速率与叶面积指数和穿透雨强度的关系, 探讨了冠下溅蚀速率的空间分布特征。结果表明: 与裸地相比, 在大豆全生育期, 大豆冠下平均溅蚀速率在设计雨强 40 mm h⁻¹和 80 mm h⁻¹下, 分别减少了 62.85% 和 60.74%。冠下平均溅蚀速率随叶面积指数增加呈显著的增加趋势, 且随降雨强度的增大而显著增加。冠下各点溅蚀速率受相应各点的穿透雨强度影响在 80 mm h⁻¹设计雨强下较为显著, 随穿透雨强度的增加而增加。大豆冠下溅蚀速率的空间分布与穿透雨的分布具有一定的对应性, 即冠下穿透雨较为集中的区域会在一定程度上增加溅蚀的发生, 并导致冠下溅蚀速率分布不均, 大豆冠下穿透雨是冠下溅蚀产生和分布的主要能量来源。该研究提出的大豆冠下溅蚀速率模型可为坡耕地土壤侵蚀防治和农田灌溉有效利用提供理论支持。

关键词 大豆; 溅蚀速率; 模拟降雨; 穿透雨; 降雨强度

中图分类号 S157.1 **文献标识码** A

雨滴滴溅侵蚀是水力侵蚀发生的最初阶段, 它既可以使溅散后的土壤颗粒成为独立体而易被径流搬运, 又可击实土壤, 产生结皮, 减缓降雨入渗, 提高径流流量而增强了其分离和搬运泥沙的能力, 有助于溶蚀和面蚀的发生与发展^[1-2]。20 世纪 40 年代 Law 和 Sreenivas 首先开展了降雨溅蚀的探讨^[3-4]。随后, 国内外许多学者也开展了相似的研究, 基本上得出了溅蚀量的大小与降雨的物理参数、土壤可蚀性、覆盖和地面坡度等因素有关的结论^[5-10]。通常情况下, 雨滴撞击土壤的速度越高, 土粒被溅起的越多; 雨滴直径越大, 打击的面积也越大; 雨强愈大, 溅蚀量也愈大^[2, 11-14]。降雨物理参数与溅蚀的关系可用降雨动能或动量来描述^[3, 15-19]。作物对降水具有再分配的能力, 既削弱了降雨能量, 又改变了降雨的分布^[20-22]。因而, 对滴溅侵蚀具有直接的影响。Sreenivas 等^[4]研究发现作物冠下侵蚀随作物冠层距地面高度的增加而增加, 并随覆盖度的增加而减少。Morgan、Nobel 和 Morgan、Finney、Armstrong 和 Mitchell 等^[20, 23-25]通过对大豆、小麦、甘蓝、甜菜和马铃薯等作物对溅蚀的影响研

究后, 也得出了相似的结论, 但综合比较后发现由于作物的种类和生物学特性的差异, 导致了其影响作用更为复杂。

大豆是黄土高原的主要作物之一, 其生长期大致与黄土高原的暴雨侵蚀期相重。本研究的目的是系统研究大豆在全生育期冠下溅蚀速率随叶面积指数、穿透雨强度和降雨强度的变化规律, 探讨种植大豆地表溅蚀速率空间分布特征及其与穿透雨空间分布的关系, 以为农田水肥管理和土壤侵蚀研究提供现实依据, 有助于对该区坡耕土壤侵蚀机理的深入认识。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试大豆品种为中黄 13, 于 2007 年 6 月上旬按 20 cm × 40 cm 的株行距种植在西北农林科技大学资源环境科研教学实验基地的试验田中, 试验地土壤为壤土, 播种前一次性施入有机肥 25000 kg hm⁻², 磷酸钙 1000 kg hm⁻², 其他管理按当地农作习惯进行。

* 国家基础研究发展规划“973”项目(2007CB407201-5)资助

† 通信作者: 吴发启, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: wufaqi@263.net

作者简介: 马波(1982—), 男, 回族, 陕西汉中, 博士研究生, 主要从事黄土高原土壤侵蚀试验研究。E-mail: mabo_916@126.com

收稿日期: 2012-02-18; 收到修改稿日期: 2012-08-06

1.2 研究方法

试验在西北农林科技大学水土保持工程实验室人工降雨大厅进行。在大豆始花期、盛花期、结荚期和始粒期,采用人工模拟降雨的方法,根据当地夏秋两季多大到暴雨的特点,设计降雨强度为 40 mm h^{-1} 和 80 mm h^{-1} ,每次降雨历时为 30 min。本试验所用人工模拟降雨机为中国科学院水利部水土保持研究所研制的下喷式降雨机,安装高度为 4 m,通过不同的喷头-阀门开关组合来实现供水压力的调节,从而达到调节降雨强度的目的。经测试,调节至任一喷头和压强组合下的降雨都是稳定的,可以被试验采用。

将大豆植株齐根切下带至室内,并按田间种植行间距垂直固定在铁质支架上,置于降雨机下方,如图 1 所示。用内径 5.5 cm 高 7 cm 的有机玻璃杯按图 1 所示以矩阵的方式置于作物冠下 $0.4 \text{ m} \times 0.7 \text{ m}$ 的行间区域。并在设计降雨强度下降雨 30 min,然后收集测量各玻璃杯水量,并计算冠下各点穿透雨强度。

大豆冠下溅蚀速率测定采用溅蚀杯法^[24]。溅蚀杯高 5 cm、直径 7 cm,底部有均匀分布的透水小孔。取杨凌当地农耕地表层土过 5 mm 筛后于 105°C 下烘干至恒重,将其装入底部铺有滤纸的溅蚀杯,并称其质量。待穿透雨观测后,在穿透雨测定区域内穿透雨观测点相应位置,依然按矩阵方式均匀放置溅蚀杯于大豆冠下(图 1),在设定降雨强度下降雨 30 min 后将溅蚀杯取出,在 105°C 烘干至恒重并称量。降雨前后两次的烘干称重质量之差即为单杯溅蚀量,并根据溅蚀杯杯口直径以及降雨历时计算单位面积的溅蚀速率。不同生长期的大豆作物均在 40 mm h^{-1} 和 80 mm h^{-1} 下分别观测。

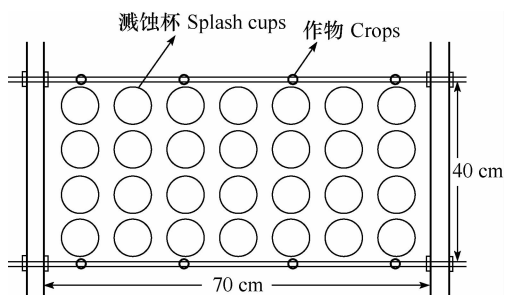


图 1 溅蚀示意图

Fig. 1 Schematic diagram of splash detachment test

裸地溅蚀量在室内测定,在大豆每个测定阶段,待大豆冠下溅蚀观测结束后,在相同降雨机下方,使用溅蚀杯 16 个按大豆冠下溅蚀杯间距摆放两

行,每行 8 个溅蚀杯,在设计雨强下分别观测溅蚀量,并测定各观测点各场降雨的降雨量。溅蚀杯土壤处理和溅蚀观测方法均与前文所述相同。

大豆叶面积测量采用比叶重法进行观测^[26]。比叶重法是在大豆个生长阶段建立大豆单位叶面积与相应面积的叶片干物质重之间的定量关系 LSI ;后将大豆所有叶片烘干称取干重,根据上述定量关系利用以下公式计算叶面积 A_L 。

$$LSI = T_{Ai}/D_{wi} \quad (1)$$

$$A_L = W \cdot LSI \quad (2)$$

式(1)和式(2)中, LSI 为比叶面积, $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$; T_{Ai} 为某生长期单位叶面积, cm^2 ; D_{wi} 为某生长期单位叶面积的干重, g ; A_L 为叶面积, cm^2 ; W 为所测植株的叶干重, g 。

叶面积指数(LAI)为单位土地面积上的总叶面积与土地面积的比值。

1.3 数据处理

研究数据的计算和分析分别采用 Excel 软件和 SPSS 软件完成。绘图采用 Surfer 10.0 与 Illustrator CS 来完成绘制。

2 结果与分析

2.1 大豆冠下溅蚀速率特征

大豆冠下溅蚀速率及穿透雨测定结果详见表 1。

从表 1 中可以看出,大豆全生育期内的冠下溅蚀速率低于裸地。由 T 检验可知,大豆各生育期内冠下溅蚀速率与裸地溅蚀速率存在极显著差异 ($P < 0.01$),大豆各个生育期之间冠下溅蚀速率也存在显著差异 ($P < 0.05$)。在 40 mm h^{-1} 和 80 mm h^{-1} 降雨强度下分别平均为 $172.82 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 和 $806.31 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$,分别较裸地降低了 62.85% 和 60.74%,说明大豆冠层对地表溅蚀的抑制作用较强。在各个降雨强度下,大豆冠下平均溅蚀速率随着大豆的生长呈降低趋势,从始花期 ($LAI = 2.16$) 到始粒期 ($LAI = 6.51$),溅蚀速率在 40 mm h^{-1} 降雨强度下减少了 59.68%,在 80 mm h^{-1} 降雨强度下也减少了 40.18%。说明随着大豆的生长,其冠层对溅蚀的抑制能力不断增强,表现出较好的规律性。降雨强度对溅蚀的影响也较为强烈,始花期 80 mm h^{-1} 降雨强度下溅蚀速率是 40 mm h^{-1} 降雨强度下的 3.69 倍,而到了始粒期,这个比例已扩大至 5.48 倍。说明较大降雨强度下的溅蚀速率远远高于较小雨强,而且这种差异会随着大豆生长而逐渐扩大。

表 1 大豆不同生育期冠下穿透雨及溅蚀特征

Table 1 Throughfall and splash detachment rate as affected by soybean canopy at different crop growth stages

降雨强度 Rainfall intensity (mm h ⁻¹)	生育期 Growth stage	观测日期 Observation date (yy-mm-dd)	叶面积 指数 LAI	大豆冠上	冠下平均	裸地溅蚀 速率 Splash detachment rate in bare land (g m ⁻² h ⁻¹)	大豆冠下溅蚀速率 Splash detachment rate under soybean canopy	
				降雨强度 Rainfall intensity above the soybean canopy (mm h ⁻¹)	穿透雨强 Average throughfall intensity under the canopy (mm h ⁻¹)		冠下平均 溅蚀速率 Average splash detachment rate under soybean canopy (g m ⁻² h ⁻¹)	变异系数 Coefficient of variation
40	始花期 Initial blossoming stage	2007-07-30	2.16	41.25	33.81	512.5	264.6	1.04
	盛花期 Full flowering stage	2007-08-10	3.77	40.60	31.82	469.8	187.4	1.37
	结荚期 Pod bearing stage	2007-08-20	5.21	39.86	32.35	393.0	132.6	1.78
	始粒期 Initial pod filling stage	2007-08-28	6.51	40.24	30.09	457.0	106.7	1.21
	平均 Mean		40.5	32.02	79.07	458.1	172.8	1.35
80	始花期 Initial blossoming stage	2007-07-30	2.16	79.86	65.39	2345	977.0	1.19
	盛花期 Full flowering stage	2007-08-10	3.77	81.56	70.33	2149	919.3	1.26
	结荚期 Pod bearing pod stage	2007-08-20	5.21	80.24	67.38	1856	744.5	1.22
	始粒期 Initial pod filling stage	2007-08-28	6.51	80.66	61.40	1798	584.4	1.38
	平均 Mean		80.58	66.12	82.05	2037	806.3	1.27

这或许是因为较大雨强下的降雨动能使行间裸露区域增加且导致冠层消能作用减弱造成的。大豆在 40 mm h⁻¹ 降雨强度下对溅蚀的抑制作用强于 80 mm h⁻¹ 降雨强度。

大豆冠下溅蚀速率随叶面积指数的变化关系如图 2 所示。从图 2 中可知,两者在不同降雨条件下均呈现很好的线性关系, R^2 均在 0.9 以

上。由此可见大豆溅蚀速率与叶面积指数关系密切。

降雨经过冠层后,叶片对降雨拦截并能在叶缘叶尖处重新形成大雨滴,从而导致冠下某些区域可能会产生大量的穿透雨,增加了溅蚀发生的潜在威胁。不同生长阶段,冠下各点溅蚀速率与其相应各点穿透雨强度的关系如表 2 所示。

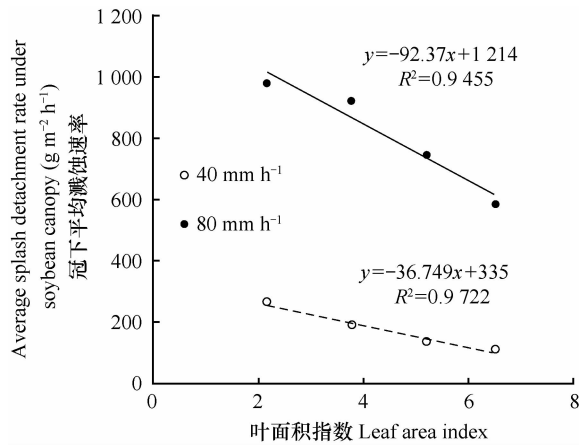


图2 不同降雨强度下大豆叶面积指数与冠下平均溅蚀速率的关系

Fig. 2 Relationship between LAI and average splash detachment rate under soybean canopy as affected by rainfall intensity

表2 不同降雨强度下大豆冠下各点溅蚀速率与对应冠下各点穿透雨强度回归关系

Table 2 Regression functions between splash detachment rate and throughfall intensity under soybean canopy as affected by rainfall intensity

生育期 Growth stages	40 mm h ⁻¹		80 mm h ⁻¹	
始花期 Initial blossoming stage	$DR_{U-P} = 4.512I_{TH} + 112.02$	$R^2 = 0.081$ $F = 2.299$	$DR_{U-P} = 28.159I_{TH} - 864.24$	$R^2 = 0.489$ $F = 24.918^{**}$
盛花期 Full flowering stage	$DR_{U-P} = 8.157I_{TH} - 72.124$	$R^2 = 0.468$ $F = 22.903^{**}$	$DR_{U-P} = 26.078I_{TH} - 914.73$	$R^2 = 0.420$ $F = 18.839^{**}$
结荚期 Pod bearing pod stage	$DR_{U-P} = 7.717I_{TH} - 117.00$	$R^2 = 0.478$ $F = 23.808^{**}$	$DR_{U-P} = 19.433I_{TH} - 564.87$	$R^2 = 0.627$ $F = 43.675^{**}$
始粒期 Initial pod filling stage	$DR_{U-P} = 2.728I_{TH} + 24.607$	$R^2 = 0.175$ $F = 5.519^*$	$DR_{U-P} = 15.957I_{TH} - 395.35$	$R^2 = 0.754$ $F = 79.779^{**}$

注: DR_{U-P} 为作物冠下各点溅蚀速率, $g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$; I_{TH} 为作物冠下对应各点穿透雨强度, $cm \cdot min^{-1}$; * 为 $p < 0.05$ 显著水平; ** 为 $p < 0.01$ 显著水平 Note: DR_{U-P} stands for splash detachment rate at each monitoring point under soybean canopy; I_{TH} for throughfall intensity at each monitoring point under soybean canopy; * for at 0.05 significant level; and ** for at 0.01 significant level

$$DR_{U-P} = -49.94LAI + 17.46I_{TH} - 146.95$$

$$R^2 = 0.533 \quad F = 126.03^{**} \quad (3)$$

式(3)中, DR_{U-P} 为作物冠下各点溅蚀速率, $g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$, LAI 为叶面积指数, I_{TH} 为作物冠下对应各点穿透雨强度, $cm \cdot min^{-1}$, ** 为 $p < 0.01$ 显著水平。

由式(3)可知,大豆冠下各点溅蚀速率与叶面积指数和各点穿透雨强度的线性关系不显著,因此不能利用式(3)推算大豆不同生长阶段冠下不同穿透雨强度下的溅蚀速率。但是对于冠下平均溅蚀速率而言,可通过冠下平均穿透雨强度和叶面积指数来计算,即可利用以下回归方程来计算,如式(4)所示。

$$DR_U = -49.05LAI + 18.50I_{THA} - 201.66$$

$$R^2 = 0.982 \quad F = 133.73^{**} \quad (4)$$

式(4)中, DR_U 为冠下平均溅蚀速率, $g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$; I_{THA} 为冠下平均穿透雨强度, $cm \cdot min^{-1}$, LAI 为叶面积指数, ** 为 $p < 0.01$ 显著水平。

2.2 大豆冠下溅蚀的空间分布

由以上分析可知大豆冠下穿透雨强度与溅蚀

从表2中可知,处于不同生长阶段的溅蚀速率与其相应的穿透雨强度均呈正相关线性关系,但是 40 mm h^{-1} 降雨强度下各阶段的 R^2 较低,最高仅为 0.478,说明在较小降雨强度下两者的线性关系不明显;而 80 mm h^{-1} 降雨强度下各阶段的线性关系均优于 40 mm h^{-1} 降雨条件,但 R^2 也较低,最高为 0.754。溅蚀速率随相应穿透雨强度增大而增大的趋势较弱,且在较小雨强下二者表现出较低的相关性。这说明种植大豆条件下,冠层下方各点穿透雨较大的区域并不一定能够产生较大的溅蚀量。大豆作物冠层较为低矮,虽然降雨经过冠层后会形成大量的大雨滴,但由于降落高度有限,形成的大雨滴并不具有较强的侵蚀动能,故不会导致较高的溅蚀量。若将大豆不同生长阶段叶面积指数和穿透雨强度对大豆冠下各点的溅蚀速率进行回归分析,结果如式(3)所示。

的相关性较低,如此其在冠下的空间分布也会受到一定程度的影响。从表1中可知,冠下溅蚀速率的变异系数 CV 值由幼苗期的 1.0 左右增加至结荚期的 1.7 左右,说明大豆溅蚀速率在进入花期 ($LAI = 2.16 \sim 3.77$) 以后分布不均匀,且随大豆生长不均匀程度逐渐加剧。但进入始粒期 ($LAI = 6.51$) 后,其不均匀性又有所降低。若将两行大豆之间的区域划分为 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 的叶下区域和 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 的行中区域(如图3Y轴所示),两个区域的溅蚀速率如表3所示。

从表中可知,大豆测试期间内,行中区域溅蚀速率较叶下区域增加了 190.3%。 40 mm h^{-1} 降雨强度下,行中区域与叶下区域溅蚀速率比值较多地在 1.4~2.2 之间变化,而 80 mm h^{-1} 降雨强度下则较多地在 2.1~6.3 之间变化,这说明大豆行间的溅蚀量多数集中于作物行中,且随着降雨强度的增大其在行中集中的程度也增大。

以 40 mm h^{-1} 降雨强度为例,大豆冠下溅蚀速率的空间分布如图3所示。

表 3 大豆全生育期内冠下不同区域溅蚀特征

Table 3 Characteristics of splash detachment rate in different regions under soybean canopy during the whole growth stage

降雨强度 Rainfall intensity (mm h ⁻¹)	生育期 Growth stages	叶面积 指数 Leaf area index	叶下区域溅蚀速率	行中区域溅蚀	行中区域溅蚀速率与	平均冠下溅蚀速率
			Splash detachment rate in the region direct under the canopy (g m ⁻² h ⁻¹)	速率 Splash detachment rate in the region between rows (g m ⁻² h ⁻¹)	叶下区域溅蚀速率的 比值 The ratio of splash detachment rates in the regions between rows/under the canopy	Average splash detachment rate under soybean canopy (g m ⁻² h ⁻¹)
40	始花期 Initial blossoming stage	2.16	208.5	320.6	1.54	264.6
	盛花期 Full flowering stage	3.77	69.39	305.4	4.40	187.4
	结荚期 Pod bearing stage	5.21	84.23	181.1	2.15	132.7
	始粒期 Initial pod filling stage	6.51	93.14	120.2	1.43	106.7
	平均 Mean	4.41	113.8	231.8	2.38	172.8
80	始花期 Initial blossoming stage	2.16	623.8	1330	2.13	977.0
	盛花期 Full flowering stage	3.77	392.2	1446	3.69	919.3
	结荚期 Pod bearing pod stage	5.21	475.0	1014	2.14	744.5
	始粒期 Initial pod filling stage	6.51	161.8	1007	6.22	584.4
	平均 Mean	4.41	413.2	1199	3.55	806.3

从图 3 中可以看到,不同时期,大豆冠下溅蚀速率分布差异较大。始花期(图 3a)冠下溅蚀速率较大者多数分布于 10~20 cm 区域内,其平均速率是 0~10 cm 区域的 1.54 倍。从始花期至盛花期,溅蚀速率较大者在行中出现较多,且大致呈带状分布。但是进入结荚期以后,虽然冠下溅蚀速率的极大值还是处于 10~20 cm 的行中区域,但是出现较大溅蚀速率的点数有所减少,在结荚期和始粒期大致呈点状分布。但是这些较大值所在点所产生的溅蚀量占整个行中 10~20 cm 区域内溅蚀总量的比重较大,其中结荚期的比重为 48.36%,始粒期时这一比重仍可达 37.96%。这表明随着大豆的生长,其冠下溅蚀量也在逐渐下降,但是其溅蚀量大部分集中于行间的少数几个点上,所占比重较大。

由前文分析得知,大豆冠下穿透雨强度与溅蚀速率分布相关性较低,这一点从图 3 中也可以看到。40 mm h⁻¹降雨强度下,大豆冠下穿透雨强度较大值出现的区域,有一部分没有出现对应的溅蚀速率较大值;而在某些穿透雨较小的区域出现了较大的溅蚀速率。大豆株型较低矮,且冠层茂密。所形成的穿透雨虽然在某些位置较大,但是由于降落高度有限,大大削弱了原有降雨的能量,因此不会产生较大的溅蚀。而由于大豆叶片相对于玉米较为柔弱,在降雨过程中吸水增重以及受降雨动能的影响发生向下弯曲,会在某些行间区域裸露出地表,如此便会加大此区域的溅蚀量,造成某些穿透雨较小区

域反而出现较大的溅蚀强度。以始粒期为例,大豆行间集中出现穿透雨强度较大的区域,但与之对应的溅蚀速率却很低,单位时间内溅蚀量约占总溅蚀量的 11%。因此,大豆冠下溅蚀速率的空间分布受穿透雨强度空间分布影响较小,其分布具有一定的随机性和不确定性。

大豆冠下溅蚀速率的空间分布受降雨强度的影响也较大。由图 4 可知,相同生长阶段不同降雨强度下溅蚀速率较大值所处位置互不对应。40 mm h⁻¹降雨强度下,溅蚀速率较大值出现在两个点上,呈点状分布;而 80 mm h⁻¹降雨强度下,溅蚀速率较大值出现在多个点上,并且在某一区域呈现片状或带状分布。这说明较大的降雨强度不仅会对溅蚀速率产生较大影响,还会影响较大溅蚀速率出现的数量和位置。较大的降雨强度,对大豆冠层影响也较大,叶片发生弯曲的程度和范围也会增加,在行间产生裸露地表的面积和范围也会扩大,这无疑会造成行间溅蚀量激增。与此同时,也使行间穿透雨强度与溅蚀速率的对应性提高,从图 4 中也可以看出 80 mm h⁻¹降雨强度下溅蚀速率分布与穿透雨强度分布对应性高于 40 mm h⁻¹降雨强度。与此同时,降雨强度对冠下溅蚀的间接作用较弱,相当部分来自于降雨强度对行间裸露地表溅蚀的直接作用。而降雨强度的增大,也会加剧冠下溅蚀速率出现较大值的随机性和不确定性,从而加剧了对冠下溅蚀的影响。

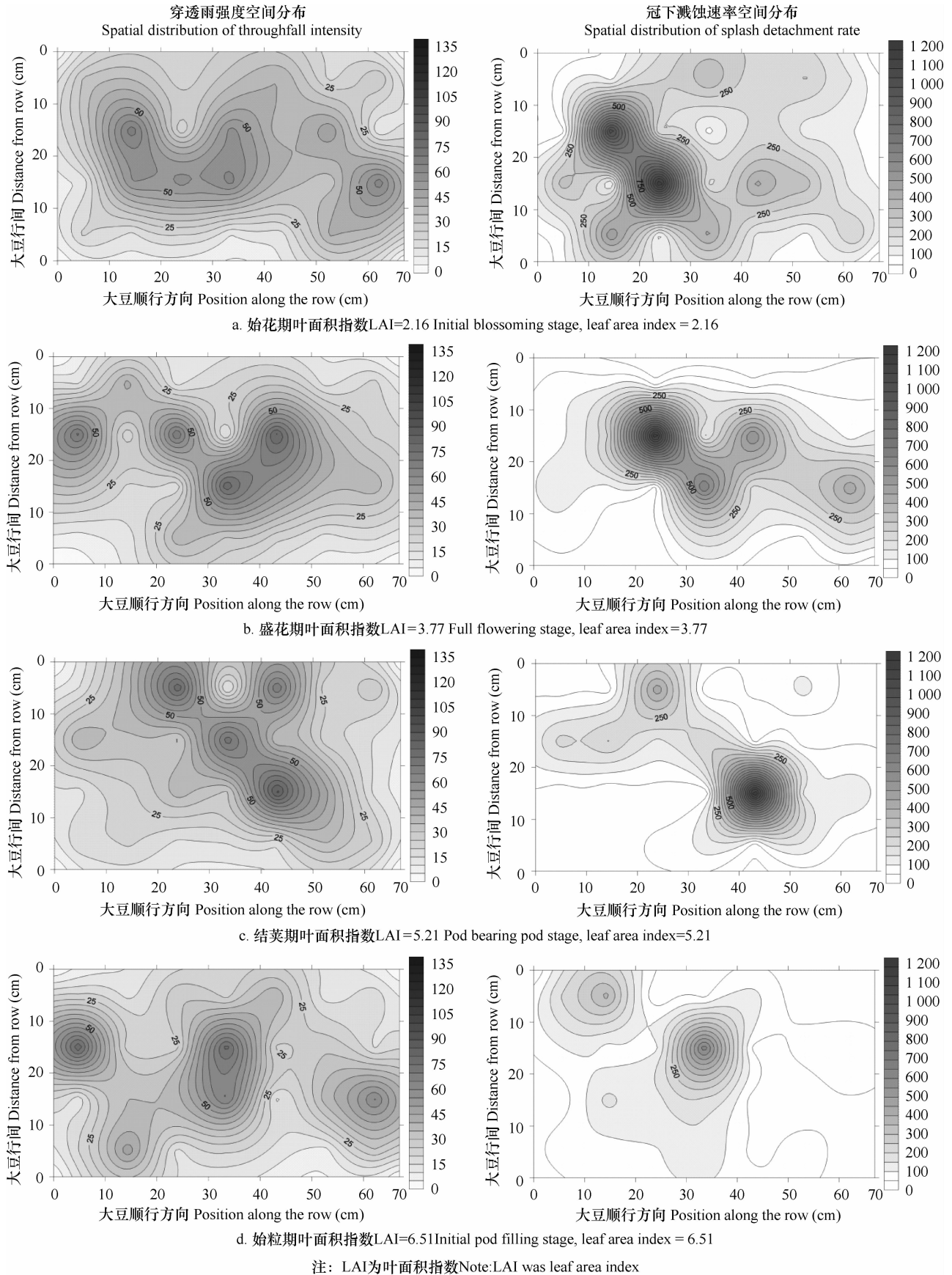


图3 不同生育期大豆冠下穿透雨与溅蚀速率空间分布特征(以 40 mm h^{-1} 降雨强度为例)

Fig.3 Spatial distribution of throughfall intensity and splash detachment rate under soybean canopy in different growth stage(Rainfall intensity was 40 mm h^{-1})

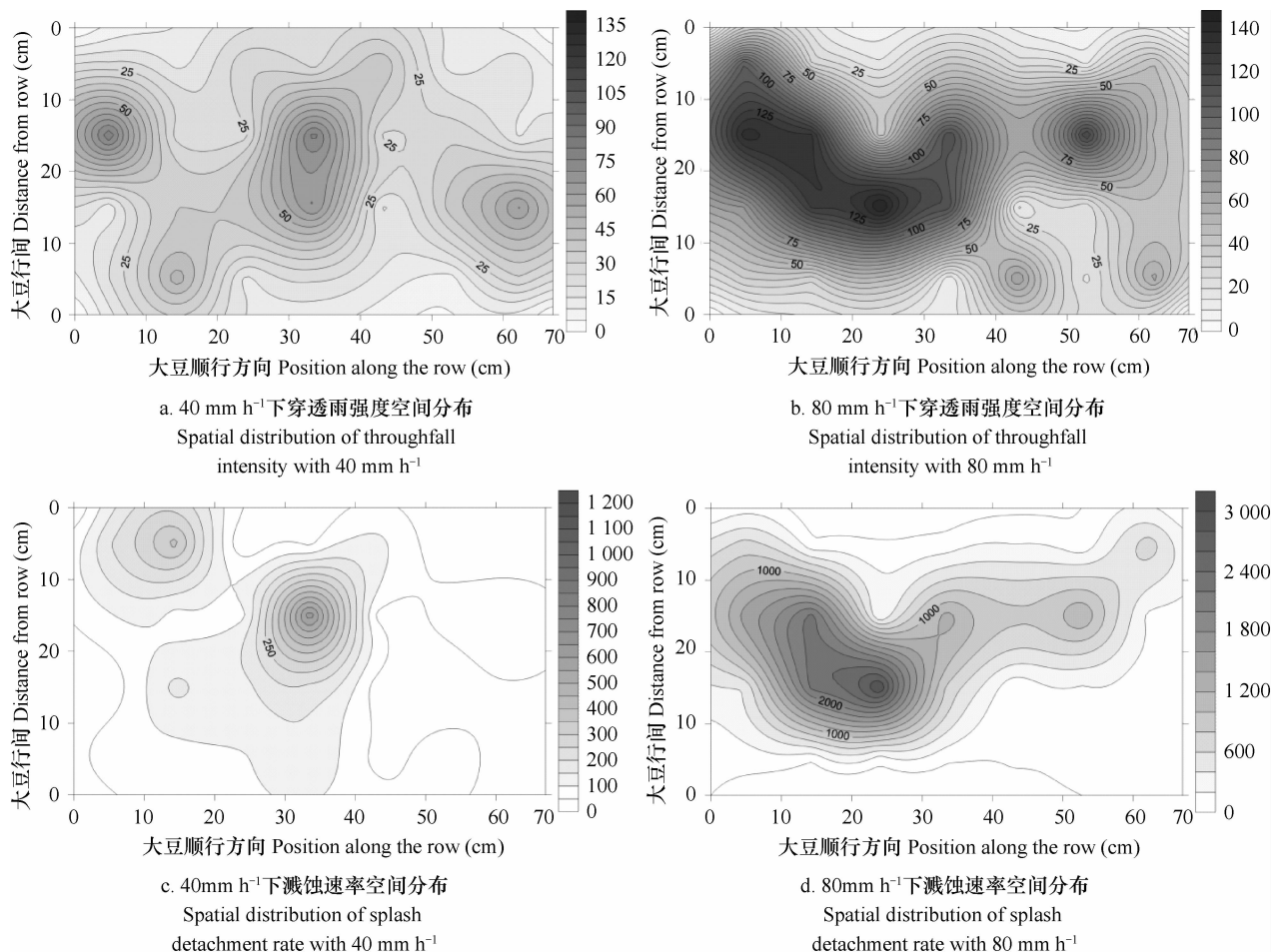


图4 不同降雨强度下大豆冠下溅蚀速率空间分布(以始粒期叶面积指数 LAI = 6.51 为例)

Fig. 4 Spatial distribution of splash detachment rate under soybean canopy at different soybean growth stages (given LAI at the initial pod filling stage was 6.51)

3 结论

作物冠层对地表的有效覆盖,使降雨对地表土壤的作用得到有效降低,在一定程度上减少了溅蚀的发生。在大豆不同生育期其冠层对溅蚀的影响作用差异较大。经测定,大豆冠下溅蚀量总体低于裸地,在其生育期内冠下溅蚀速率较裸地降低了48%~77%左右,平均约为61%,随叶面积指数的增加,冠下溅蚀速率呈下降趋势,两者具有显著的线性关系。降雨强度对大豆冠下溅蚀速率影响较大,其中 80 mm h^{-1} 设计雨强下平均溅蚀速率大约为 40 mm h^{-1} 下的4.67倍,大豆在 40 mm h^{-1} 设计雨强下对溅蚀的抑制作用强于 80 mm h^{-1} 设计雨强。大豆冠下穿透雨的空间分布与溅蚀速率的分布在 80 mm h^{-1} 设计雨强下具有较好的对应关系,即冠下穿透雨强度较大的区域往往也产生了较大

的溅蚀量。降雨经过冠层后重新形成的大雨滴具有导致溅蚀发生和分布不均的潜在威胁,需要进一步对大豆冠层下方大雨滴与溅蚀的关系进行深入的研究和讨论。

参考文献

- [1] 刘秉正,吴发启. 土壤侵蚀. 西安: 陕西人民出版社, 1997. Liu B Z, Wu F Q. Soil erosion (In Chinese). Xi'an: Shaanxi People Press, 1997.
- [2] 郑粉莉,江忠善,高学田. 水蚀过程与预报模型. 北京: 科学出版社, 2008. Zheng F L, Jiang Z S, Gao X T. Water erosion process and prediction model (In Chinese). Beijing: Science Press, 2008.
- [3] Law J O, Parsons D A. The relationship of raindrop size to intensity. Trans Am Geophy Union, 1943, 22: 452—459
- [4] Sreenivas L, Johnston J R, Hill H O. Some relationships of vegetation and detachment in the erosion process. Soil Science Society of America Proceedings, 1947, 12: 471—474
- [5] 刘和平,符素华,王秀颖,等. 坡度对降雨溅蚀影响的研究.

- 土壤学报, 2011, 48(3): 479—486. Liu H P, Fu S H, Wang X Y, et al. Effects of slope gradient on raindrop splash erosion (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 (3): 479—486
- [6] 苗全安,曹凑贵,汪金平,等. 丹江口库区坡耕地不同作物对土壤溅蚀的影响. 中国水土保持科学, 2011, 9(5): 11—14. Miao Q A, Cao C G, Wang J P, et al. Effects of different crop systems on soil splash erosion from sloping land in Danjiangkou Reservoir region (In Chinese). *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(5): 11—14
- [7] 马波,吴发启,马璠. 谷子冠层下的土壤溅蚀速率特征. 干旱地区农业研究. 2010, 28(1): 130—135. Ma B, Wu F Q, Ma F. Characteristics of splash detachment rate under millet canopy (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(1): 130—135
- [8] 周一杨,王恩姮,陈祥伟. 不同开垦年限黑土溅蚀与团聚体分选特征. 应用生态学报. 2009, 20(10): 2 411—2 416. Zhou Y Y, Wang E H, Chen X W. Splash erosion of black soil with different reclamation years and its relations to soil aggregates selective characteristics (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(10): 2 411—2 416
- [9] 郑子成,何淑勤,吴发启. 降雨条件下耕作方式对地表糙度的溅蚀效应. 农业工程学报, 2009, 25(11): 103—108. Zheng Z C, He S Q, Wu F Q. Splash erosion effects of tillage practices on soil surface roughness under different rainfall conditions (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(11): 103—108
- [10] 周一杨,王恩姮,陈祥伟. 模拟降雨条件下黑土溅蚀与团聚体分选特征. 水土保持学报, 2008, 22(6): 176—179. Zhou Y Y, Wang E H, Chen X W. Splash erosion and selective characteristics of aggregate for typical black soil under artificial rainfall condition (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(6): 176—179
- [11] Morgan R P C. Splash detachment under plant covers: Results and implications of a field study. *Transactions of the ASABE*, 1982, 25(4): 987—991
- [12] Moss A J, Green T W. Erosive effects of the large water drops (gravity drops) that fall from plants. *Australian Journal of Soil Research*, 1987, 25: 9—20
- [13] 韩学坤,吴伯志,安瞳昕,等. 溅蚀研究进展. 水土保持研究, 2010, 17(4): 46—51. Han X K, Wu B Z, An T X, et al. Advance of research for splash erosion (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(4): 46—51
- [14] 郭耀文. 雨滴侵蚀特征分析. 中国水土保持, 1997 (4): 21—23. Guo Y W. Characteristics of raindrop erosion (In Chinese). *Soil and Water Conservation in China*, 1997 (4): 21—23
- [15] 江忠善,宋文经,李秀英. 黄土地区天然降雨雨滴特性研究. 中国水土保持, 1983(3): 32—36. Jiang Z S, Song W J, Li X Y. Study of natural rainfall characteristics in Loess Plateau (In Chinese). *Soil and Water Conservation in China*, 1983 (3): 32—36
- [16] 牟金泽. 雨滴速度计算公式. 中国水土保持, 1983(3): 42—43. Mou J Z. Calculation formula of raindrop speed (In Chinese). *Soil and Water Conservation in China*, 1983 (3): 42—43
- [17] 徐锐. 关于天然降雨和人工降雨的动能计算方法. 中国水土保持, 1983(3): 39—41. Xu R. The calculation method kinetic energy about natural rainfall and artificial rainfall (In Chinese). *Soil and Water Conservation in China*, 1983 (3): 39—41
- [18] 章文波,谢云,刘宝元. 降雨侵蚀力研究进展. 水土保持学报, 2002, 16(5): 43—46. Zhang W B, Xie Y, Liu B Y. Research evolution of rainfall erosivity (In Chinese). *Journal of Soil Water Conservation*, 2002, 16(5): 43—46
- [19] 高学田,包忠谟. 降雨特性和土壤结构对溅蚀的影响. 水土保持学报, 2001, 15(3): 24—26. Gao X T, Bao Z M. Study on effects of rainfall and soil structure on raindrop splash (In Chinese). *Journal of Soil Water Conservation*, 2001, 15 (3): 24—26
- [20] Armstrong L C, Mitchell K J. Transformations of rainfall by plant canopy. *Transactions of the ASABE*, 1987, 30(3): 688—696
- [21] Armstrong L C, Mitchell K J. Plant canopy characteristics and processes which affect transformation of rainfall properties. *Transactions of the ASABE*, 1988, 31(5): 1 400—1 409
- [22] 马璠. 作物植被对坡耕地土壤侵蚀的影响研究. 西安: 西北农林科技大学, 2009. Ma F. Effects of crop cover on soil erosion on slope land (In Chinese). Xi'an: Northwest A&F University, 2009
- [23] Noble C A, Morgan R P C. Rainfall interception and splash detachment with Brussels sprouts plant: A laboratory simulation. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1983, 8: 569—577
- [24] Finney H J. The effect of crop covers on rainfall characteristics and splash detachment. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1984, 29: 337—343
- [25] Morgan R P C. Effect of corn and soybean canopy on soil detachment by rainfall. *Transactions of the ASABE*, 1985, 28(4): 1 135—1 140
- [26] 段爱旺. 作物群体叶面积指数的测定. 灌溉排水, 1996, 15(1): 50—53. Duan A W. Determination of crop leaf area index (In Chinese). *Irrigation and Drainage*, 1996, 15 (1): 50—53

SPLASH DETACHMENT EFFECT AND ITS SPATIAL DISTRIBUTION UNDER SOYBEAN CANOPY

Ma Bo¹ Wu Faqi^{1†} Ma Fan²

(1 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Institute of Desertification control, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Science, Yinchuan 750002, China)

Abstract In order to systematically investigate variation of splash detachment under soybean cover and to establish a simple practical model, with which to evaluate effects of soybean crop on splash detachment, rainfalls, 40mm h⁻¹ and 80mm h⁻¹ in intensity, were simulated indoors for measuring throughfall intensities and splash detachment rates under soybean canopy at different growth stages, analyzing relationships of splash detachment rate and throughfall intensity with LAI, and exploring spatial distribution of splash detachment rates under soybean canopy. Results show that compared to bare soil, the field with soybean was 62.85% and 60.74% lower in average splash detachment rate of the whole growth period under rainfall, 40 mm h⁻¹ and 80 mm h⁻¹, in intensity, respectively. The average splash detachment rate under soybean canopy displayed a significant trend of rising with LAI and rainfall intensity. The splash detachment rates at various monitoring points were significantly affected by the throughfall intensities at the corresponding positions, especially under the rainfall, mm h⁻¹ in intensity, increasing with throughfall intensity. The spatial distribution of splash detachment rates corresponded to a certain extent with the distribution of throughfall under soybean canopy. In another word, in places where throughfall under canopy concentrated, splash detachment would increase to a certain extent, thus leading to uneven distribution of splash detachment rates under canopy. Therefore, throughfall is the major source of energy triggering splash detachment and affecting its distribution. The splash detachment model proposed in this study could provide some theoretical support for soil erosion control and effective use of irrigation water on slope lands.

Key words Soybean; Splash detachment rate; Simulated rainfall; Throughfall; Rainfall intensity

(责任编辑:过 园)